

УДК 539.4

В.О. Маковей

ПРИРОДА РУЙНУВАННЯ СТАЛЕЙ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Вступ

Проведені експерименти з динамічного руйнування твердих тіл виявили ряд ефектів, які суперечать класичним моделям міцності і тріщиностійкості. Природа швидкісної залежності тріщиностійкості на сьогодні не до кінця вивчена [1].

При розробці моделі руйнування сталей за імпульсного навантаження необхідно враховувати механічні властивості, мікроструктурні особливості руйнування різних структурних рівнів і часовий чинник. При феноменологічному підході опис міцносних властивостей зводиться до введення понять про межу міцності, граничний стан матеріалу та тріщиностійкості [2]. Межі міцності або характеристики тріщиностійкості надається зміст константи матеріалу. У той же час, існує кінетичний підхід до опису розвитку руйнування матеріалів [3]. Найважливішою характеристикою кінетичної теорії міцності є час від моменту прикладання навантаження до руйнування конструкції (так звана довговічність), що дає можливість об'єднати і проаналізувати руйнування при різних швидкостях прикладання імпульсного навантаження [4].

При експериментальних дослідженнях тріщиностійкості сталей встановлено ефект зростання критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) за зростання швидкості зміни КІН [1, 5]. Значення тріщиностійкості (критичний КІН) збільшується багаторазово [1] порівняно із статичним як для сталей, так і для полімерних матеріалів. Якщо в статистиці критичний коефіцієнт інтенсивності напружень можна вважати за константу при виконанні умов лінійної механіки руйнування, то в динаміці експериментально визначені критичні значення тріщиностійкості залежать від швидкості навантаження та способу прикладання навантаження і не є константами.

Внеском у вирішення даної проблеми стала концепція інкубаційного часу [6]. Було запропоновано відмовитися від традиційного критерію і вважати, що руйнування настає тоді,

коли поточний динамічний КІН $K_I(t)$ перевищує в'язкість руйнування протягом деякого мінімального (інкубаційного) часу, який вважається за константу матеріалу. Проте достатньої експериментальної перевірки запропонованої концепції нема.

Постановка задачі

Метою статті є дослідження просторово-часової природи динамічного руйнування на основі отриманих раніше експериментальних даних з руйнування сталей різних класів при імпульсному навантаженні.

Дослідження впливу імпульсного навантаження на руйнування сталей

Довгий час єдиною можливістю експериментального вивчення процесу руйнування твердих тіл у мікросекундному діапазоні руйнування було дослідження відколу, тобто руйнування в плоских хвилях навантаження (рис. 1), яке виникає при навантаженні зразка 3 пластиною 4 з високою швидкістю до 1000 м/с.

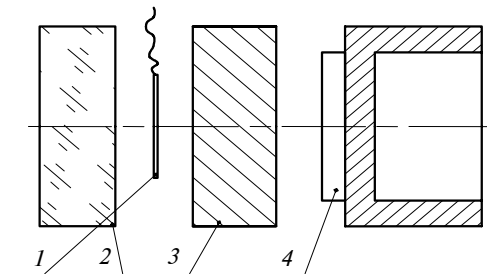


Рис. 1. Схема дослідження руйнування відколом: 1 – датчик; 2 – накладка з органічного скла (ПММА); 3 – зразок; 4 – пластина

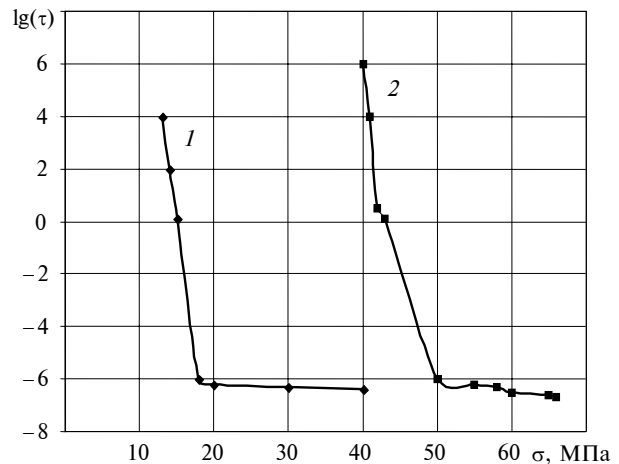


Рис. 2. Часові залежності міцності алюмінію (1) та алюмінієвого сплаву В-95 (2)

З отриманих при навантаженні плоскими ударними хвилями експериментальних залежностей руйнівного напруження від часу прикладання навантаження спостерігається злам кривої при переході від квазістатичних руйнувань до руйнувань відколом (рис. 2) [7].

Існуючі часові схеми відколу не допускають кореляції квазістатичної міцності та відкольної міцності. У статті [8] передбачається існування руйнування під дією напруження, яке дорівнює теоретичній міцності (для сталі Ст 3 $\sigma = 19300$ МПа).

Таблиця 1. Результати досліджень динамічної міцності і часу наростання навантаження для Ст 3

Статична межа міцності, МПа	Динамічна межа міцності, МПа	Час наростання навантаження до максимуму, мкс	Джерело
400	1600	2,18	[9]
400	2700	0,66	
400	4600	0,22	[10]
400	5600	0,18	
400	6400	0,15	
400	7400	0,14	
400	9600	0,10	
400	11400	0,06	

Процес руйнування, який виникає при взаємодії зустрічних хвиль розрідження, характеризується дуже малим часом (≤ 1 мкс) і високим руйнівним напруженням, що в багато разів перевищує статичну межу міцності [9, 10]. Аналізуючи експериментальні дослідження різних авторів [9, 10] для сталі Ст 3 (табл. 1), можна встановити тенденцію збільшення руйнів-

ного напруження із збільшенням швидкості навантаження і прагнення довести його значення до теоретичної міцності. Незважаючи на це, можна побачити, що руйнування відколом має особливості, подібні до квазістатичного руйнування. Воно також починається з появи зародкових дефектів і закінчується ростом мікро- і макротріщин [8].

Розробка нової методики дослідження руйнування відривом при випробуванні кільцевих зразків при імпульсному навантаженні з швидкостями ударника 140–600 м/с (рис. 3) дала можливість розширити уявлення про природу руйнування [1, 5]. Випробування проводилось на пневмопороховому копрі (гарматі) в Інституті проблем міцності НАН України. При цьому зразок 3 закріплювався перед дульним зрізом копра на фланці 5 і навантажувався внутрішнім імпульсним тиском при стискуванні алюмінієвого циліндра 4 між сталевим ударником 6, який закріплений на алюмінієвому стакані 7, рухався із швидкістю 140–600 м/с, і нерухомим сталевим диском 2 (рис. 3, а). Вимірювальним комплексом, в який входять два електронні осцилографи і секундоміри, реєструвались сигнали від датчиків пружної деформації 1 і датчика розриву 2, який контролював початок руху тріщини (рис. 3, в) та швидкість ударника перед вильотом із копра.

Слід розрізняти кінетику руйнування зразків із заздалегідь наведеними втомними тріщинами (див. рис. 3) і суцільних, появи макротріщини в яких передують еволюція дефектної структури. Як характеристика руйнування прийнято коефіцієнт інтенсивності напруження K_{1d} у вершині тріщини в момент її зрушення (тріщиностійкість). Залежність цього коефіцієнт

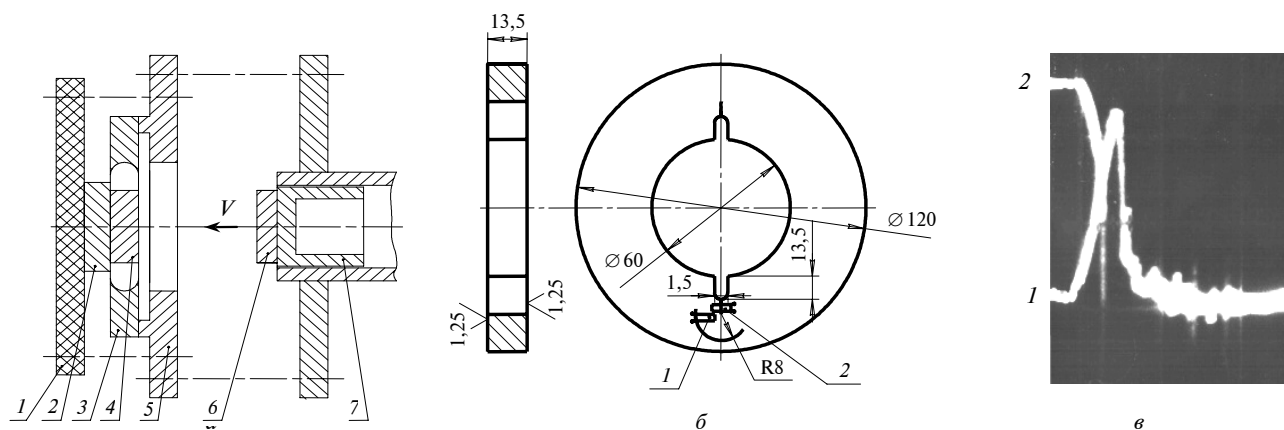


Рис. 3. Схеми випробувань кільцевих зразків (а), наклейки на них датчиків (б); типові осцилограми сигналів від датчиків: 1 – пружної деформації; 2 – датчика розриву (в)

від швидкості зміни КІН (K'_I) наведена на рис. 4. За результатами досліджень динамічної тріщиностійкості побудовано залежність часу прикладання навантаження до моменту зрушення тріщини (довговічності) від КІН (рис. 5).

Таким чином, результати досліджень показують, що розвиток макротріщин у мікросекундному діапазоні має просторово-часовий характер, контролюється пружною енергією, накопиченою у зразку, і включає формування поля напружень, накопичення мікропошкоджень, утворення яких може описуватися кінетичним рівнянням Журкова [3]. В утворенні так званих геометричних тріщин на відміну від силових бере участь пластична деформація [4].

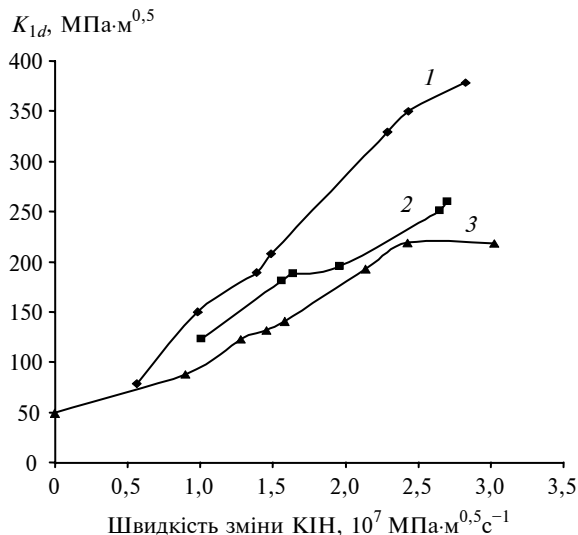


Рис. 4. Залежність динамічної тріщиностійкості сталей від швидкості зміни КІН (K'_I): 1 – Ст 3, $T = 293$ К, $B = 20$ мм; 2 – Ст 3, $T = 153$ К, $B = 15$ мм; 3 – сталь 40Х, $T = 293$ К, $B = 12,5$ мм (46–50 HRC)

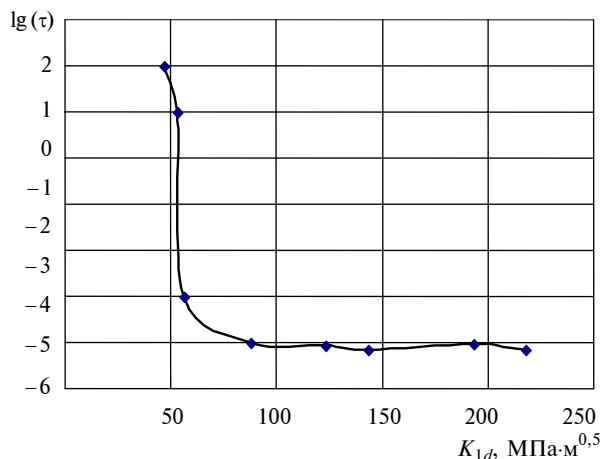


Рис. 5. Залежність тріщиностійкості сталі 40Х (46–50 HRC) від часу

Слід зазначити, що поведінка матеріалу з тріщиною і суцільного матеріалу характеризується довговічністю з двома гілками для високих і низьких швидкостей навантаження. Розмір перехідної ділянки менше для матеріалів, в яких неоднорідність будови і дефектність структури менші.

Природа і моделі динамічного руйнування сталей

При імпульсному навантаженні тимчасово затримується момент початку руйнування, який визначається швидкістю поширення хвилі напруження і запізнюванням текучості. Запізнювання текучості пояснюється переважно з позицій теорії дислокацій [11]. Передбачається, що навколо дислокації утворюється атмосфера (хмара) з атомів, яка тісно з нею пов'язана, а можливість вийти з атмосфери визначається прикладеним навантаженням і температурою. Ця дія зменшується із збільшенням напруження і температури. Коли звільнена дислокація доходить до границі зерна, то щоб пройти цю границю, потрібна значно більша сила, ніж для звільнення. Той момент, коли дислокації, що скупчилися, проходять границю, вважається за початок пластичної течії [11].

У статті [12] підтверджується можливість ефекту відсутності пластичної течії при малій тривалості зовнішнього навантаження, незважаючи на те, що при тривалішому навантаженні з тим же рівнем напружень зразок пластично деформується. Цей ефект пояснюється тим, що за час дії імпульсу не встигають виникнути флуктуації напруження, необхідні для руху дислокацій. При тривалості імпульсу зовнішнього напруження $\tau \sim 50$ мкс флуктуації напруження не викличуть руху дислокацій з вірогідністю 0,9, а при тривалості $\tau \sim 5$ мкс вони не викликають руху дислокацій з вірогідністю 0,99. Компенсувати даний ефект, тобто викликати пластичну деформацію при короткому імпульсі, можна підвищенням напруження в імпульсі (навіть невелике підвищення напруження веде до значного зниження вірогідності відсутності пластичної деформації тіла). Цей результат можна інтерпретувати як зростання межі текучості при зменшенні тривалості ударного навантаження.

Спроби врахувати час затримки руйнування (інкубаційний час) розрахунковим і експериментальним способом зіткнулися з великими труднощами. У статтях [13–15] пропонується

підхід, основу якого становить введення деякого елементарного просторово-часового осередку руйнування, коли вводиться структурний розмір і структурний час руйнування, які вважаються постійними для даного матеріалу, і запропоновано структурно-часовий критерій

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{1}{d} \int_0^d \sigma(r, \theta, t') dr dt \leq \sigma_c, \quad (1)$$

де $d = 2K_{lc}^2 / (\pi \sigma_c^2)$ – структурний розмір для умов плоскої деформації; σ_c – статична міцність матеріалу; $\tau = d/C$ – структурний час руйнування, який визначається властивостями кожного матеріалу; K_{lc} – тріщиностійкість для умов плоскої деформації при статичному навантаженні; $\sigma(r, \theta, t')$ – максимальне розтягувальне напруження у вершині тріщини ($r = 0$); C – швидкість пружних хвиль у матеріалі.

У статті [14] розглядається модельна напівнескінченна тріщина в необмеженій пружній плоскості, де до берегів тріщини прикладається рівномірно розподілене імпульсне навантаження прямокутного профілю. Там використане поняття структурного (інкубаційного) часу (характерного часу релаксації процесу перед руйнуванням), що є масштабним параметром на часовій шкалі, причому інкубаційний час вважається за константу матеріалу, пов'язану із структурними процесами. Даний підхід дістав назву критерію мінімального структурного часу, має феноменологічний характер і не враховує зміну механічних та фізичних властивостей матеріалу у вершині тріщини під час імпульсного навантаження. Поняття інкубаційного часу введено набагато раніше в статті [16], але при цьому не вважалося, що це стала матеріалу.

Одночасно з [13, 14] автором даної статті було запропоновано модель і двопараметричний просторово-часовий критерій руйнування при внутрішньому імпульсному навантаженні тиском сталевго кільця з двома радіальними тріщинами [17], який враховує зміну фізико-механічних властивостей матеріалу і потребує одночасного виконання енергетичного критерію

$$\frac{dW}{dl} = \frac{1}{\rho_c} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_t} \int_0^{t_c} r(\theta, t) \sigma_1(r, t, \theta) \varepsilon'(r, t, \theta) d\theta dr dt \leq$$

$$\leq \frac{d(F - U)}{dl}, \quad (2)$$

де $\frac{dW}{dl}$ – енергія, необхідна на просування тріщини на одиницю довжини; $r(\theta, t)$ – радіус пластичної зони; r, θ – полярні координати; t_0 – момент початку пластичної течії; t_c – момент настання критичного стану; $\varepsilon'(r, t, \theta)$ – швидкість пластичної течії матеріалу; $\sigma_1(r, t, \theta)$ – головне напруження, яке діє в локальній області вершини тріщини; F – робота, що здійснюється зовнішньою силою; U – пружна енергія, що міститься в зразку; ρ_c – величина просування тріщини, яка відповідає розміру структурного параметра (розмірам фасеток сколу або МЗР) та деформаційного критерію

$$\varepsilon(\rho_c) = \varepsilon_c.$$

За тривалості дії імпульсу навантаження $\tau < 5$ мкс (див. рис. 3, в) можливе руйнування матеріалу у вершині тріщини при досягненні теоретичної міцності [18].

Згідно з пружно-в'язко-пластичною моделлю деформації матеріалу, швидкість течії його можна записати у вигляді

$$\varepsilon'(r, t, \theta) = \frac{\sigma_1(r, t, \theta) - \sigma_1^T}{k \mu_\tau}, \quad (3)$$

де μ_τ – коефіцієнт в'язкості матеріалу; k – коефіцієнт, що враховує напружений стан.

Пластична течія матеріалу в будь-якій точці непружної області поблизу вершини тріщини настає при досягненні головним напруженням (при $\theta = 0$ нормальним до плоскості тріщини) величини, яка визначається з виразу

$$\sigma_1^T = \frac{\sigma_T^L \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \right)}{\sqrt{(1 - 2\nu)^2 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2}}}, \quad (4)$$

де σ_T^L – динамічна межа текучості, яка визначається експериментально; ν – коефіцієнт Пуассона.

Розподіл напружень у непружній області після початку течії залежить від швидкості росту КІН (K_I') і в будь-який момент часу визначається залежністю

$$\sigma_1(r, t, \theta) = \left[\frac{K'_1}{\sqrt{2\pi r}} t_0 + \frac{K'_1}{2\sqrt{2\pi r}} (t - t_0) \right] \times \left(\cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right), \quad (5)$$

де $K'_1/2$ – середня швидкість росту КІН в пластичній зоні.

Радіус пластичної зони, який залежить від швидкості навантаження і часу і визначає її розміри, знайдемо за формулою

$$r(\theta, t) = \frac{(K'_1)^2}{4\pi(\sigma_T^a)^2} t^2 [3/2 \sin^2 \theta + (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \theta)]. \quad (6)$$

Згідно з формулою (6), радіус збільшується в часі до моменту зрушення тріщини. Руйнування контролюється одночасно двома критеріями: енергією, що підводиться до вершини тріщини, і деформацією перед вершиною тріщини на відстані ρ_c , яка досягає критичного значення. При цьому відбувається зміна фізико-механічних властивостей матеріалу у вершині тріщини під дією концентрації напружень імпульсного навантаження. У зв'язку з досягненням надвисоких швидкостей деформації у вершині тріщини можливе досягнення теоретичної міцності: виникає чисто силовий її розв'язок.

Експериментальне дослідження ефекту часової затримки руйнування сталей

В експериментах з руйнування кільцевих зразків із двома радіальними тріщинами з ви-

користанням схеми випробувань (див. рис. 3) [1, 5] досліджувався вплив швидкості навантаження і низької температури на динамічну довговічність і було визначено час до настання критичного стану t_c (довговічність) та інкубаційний час динамічного руйнування $t_{\text{інк}}$ (затримка руйнування). Час до зрушення тріщини оцінювався реєстрацією сигналів від тензорезисторів, наклеєних перед тріщиною (див. рис. 3), за допомогою вимірювального комплексу, куди входять електронні осцилографи. Результати випробувань показують існування для різних сталей свого характерного інкубаційного часу (затримки руйнування), який визначається за формулою

$$t_{\text{інк}} = \frac{K_{1d} - K_{1c}}{K'_1}. \quad (7)$$

Підтверджується гіпотеза Кальтхофа [16], відповідно до якої вершина тріщини при імпульсному навантаженні повинна випробовувати дію надкритичного КІН, яке значно більше статичного $K_{1d} > K_{1c}$, починаючи з певного мінімального часу до початку швидкого поширення тріщини (рис. 6).

Даний інтервал часу названий інкубаційним періодом, причому припускається, що коли КІН повільно збільшується в часі, то затримка руйнування, пов'язана з цим, мала.

У табл. 2 наведено результати випробувань різних класів сталей із вимірюванням часу від початку навантаження до зрушення тріщини і оцінкою інкубаційного часу за формулою (7) із врахуванням впливу швидкості зміни КІН і температури випробувань. Ці дослідження допомогли створенню спеціальних низьковугле-

Таблиця 2. Результати досліджень тріщиностійкості і часу руйнування сталі

Марка сталі	КІН, МПа·м ^{0,5}	Швидкість зміни КІН, МПа·м ^{0,5} /с	Температура випробувань, К	Час до зрушення t_c , мкс	Інкубаційний час $t_{\text{інк}}$, мкс
Сталь 40Х	117–141	$(1,2–2) \cdot 10^7$	293	8,83	5,34
Сталь 40Х	193–219	$(2,1–3) \cdot 10^7$	293	8,4	6,4
Сталь Ст3	336–380	$(2,3–2,8) \cdot 10^7$	293	14,3	11,4
Сталь Ст3	240–300	$(1,6–2,2) \cdot 10^7$	153	9,6	5,2
Сталь ($\sigma_B = 1100$ МПа)	630–670	$(1,6–2) \cdot 10^7$	293	35–39	
Сталь ($\sigma_B = 1100$ МПа)	620–690	$(3,2–3,5) \cdot 10^7$	213	19,3–19,7	
Сталь ($\sigma_B = 1100$ МПа)	650–700	$(6,5–7,3) \cdot 10^7$	153	10–9,6	

цевих сталей, міцність ($\sigma_B = 1100$ МПа) та тріщиностійкість яких у два-три рази перевищують міцність і тріщиностійкість відомих низьковуглецевих сталей (див. табл. 2). При цьому час до зрушення тріщини залежно від температури також збільшується у два-три рази.

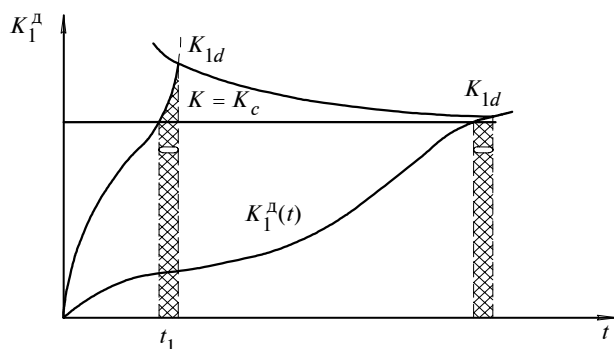


Рис. 6. Вплив інкубаційного часу на динамічну тріщиностійкість [16]

Як показують результати випробувань (див. табл. 2), більшому інкубаційному часу відповідає більше значення тріщиностійкості. Інкубаційний час збільшується з підвищенням швидкості навантаження. Він знижується при від'ємних температурах та залежить від матеріалу і його стану. Час до зрушення тріщини (довговічність) малочутливий до швидкості навантаження, починаючи з деякого рівня, але з пониженням температури до 153 К стає меншим.

Висновки

Запропоновані модель і критерій руйнування, які мають просторово-часовий характер, дають можливість показати вплив на тріщиностійкість параметрів, що відповідають за зміни в часі концентрації напружень та фізико-механічних властивостей матеріалу у вершині тріщини за умов імпульсного навантаження.

Нами не встановлено аналогічного впливу високої швидкості навантаження і пониження температури до 153 К на тріщиностійкість. Для збереження постійної тріщиностійкості при зниженні температури необхідно підвищувати швидкість навантаження (див. табл. 2).

У статті вперше експериментально досліджено тимчасову затримку руйнування відривом при імпульсному навантаженні і час до зрушення тріщини (динамічну довговічність). При руйнуванні сталей під дією імпульсного навантаження існує кореляція між тріщиностійкістю і інкубаційним часом (часом затримки руйнування), а час до зрушення тріщини (динамічна довговічність) не залежить від швидкості навантаження та змінюється залежно від матеріалу і його структури, зменшується з пониженням температури. Динамічна довговічність може бути характеристикою стійкості сталі до руйнування при імпульсному навантаженні, але для цього необхідні подальші її дослідження на в'язких сталях різних класів.

В.А. Маковей

ПРИРОДА РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Исследована пространственно-временная природа разрушения. При этом проанализированы результаты исследований динамической прочности и трещиностойкости. Предложенные модель и критерий разрушения, которые носят пространственно-временной характер, дают возможность установить влияние на трещиностойкость параметров, отвечающих за изменение во времени концентрации напряжений и физико-механических свойств материала в вершине трещины в условиях импульсного нагружения.

V.O. Makovei

THE NATURE OF STEEL DESTRUCTION AT IMPULSIVE LOADING

The present paper reveals the spatio-temporal nature of failure and analyzes the research results of dynamic durability and fracture toughness. The model and failure criterion enable to set the influence on the fracture toughness parameters. Specifically, these parameters predetermine the time change concentration of tensions and mechanical properties of material in the top of the crack under the conditions of impulsive loading.

1. Степанов Г.В., Маковей В.А. Динамическая трещиностойкость конструкционных материалов. — К.: Наук. думка, 1993. — 144 с.
2. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. — М.: Металлургия, 1978. — 256 с.
3. Журков С.Н., Петров В.А. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел // Докл. АН СССР. — 1978. — **239**, № 6. — С. 1316–1319.
4. Инденбом В.Л., Орлов А.Н. Долговечность материала под нагрузкой и накопление повреждений // Физика металлов и металловедение. — 1977. — **43**, № 3. — С. 469–492.
5. Степанов Г.В., Маковей В.А. Влияние скорости нагружения на трещиностойкость закаленной стали // Пробл. прочности. — 1984. — № 6. — С. 31–35.
6. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. О концепции структурного времени в теории динамического разрушения хрупких материалов // Докл. РАН. — 1992. — **324**, № 5. — С. 964–967.
7. Златин Н.А., Мочалов С.М., Пугачев Г.С., Брагов А.М. Временные закономерности процесса разрушения металлов при интенсивных нагрузках // ФТТ. — 1974. — **16**, № 6. — С. 1752–1755.
8. Молодец А.М., Дремин А.Н. Две стадии откольного разрушения // Докл. АН СССР. — 1979. — **249**, № 6. — С. 1361–1364.
9. Дремин А.Н., Молодец А.М. Кинетические характеристики откольного разрушения // ПМТФ. — 1980. — № 6. — С. 85–95.
10. Ахмадеев Н.Х., Нигматулин Р.И. Моделирование откольного разрушения при ударном деформировании. Анализ схемы мгновенного откола // Там же. — 1981. — № 3. — С. 120–128.
11. Суворова Ю.В. Запаздывание текучести в сталях // Там же. — 1968. — № 3. — С. 55–62.
12. Морозов Н.Ф., Шихобалов Л.С. О влиянии длительности ударного нагружения на предел текучести // Докл. РАН. — 2008. — **422**, № 4. — С. 479–483.
13. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Динамическая вязкость разрушения в задачах инициирования роста трещин // Механика твердого тела. — 1990. — № 6. — С. 108–111.
14. Петров Ю.В. О квантовой природе динамического разрушения хрупких сред // Докл. АН СССР. — 1991. — **321**, № 1. — С. 66–68.
15. Петров Ю.В. Об инкубационной стадии разрушения и структурных превращениях в сплошных средах при импульсном вводе энергии // Механика твердого тела. — 2007. — № 5. — С. 42–48.
16. Kalthoff J.F. Fracture behavior under high rates of loading // Engineering fracture mechanics. — 1986. — **23**, № 1. — P. 289–298.
17. Маковей В.А. Особенности разрушения сталей при импульсном нагружении // Пробл. прочности. — 1990. — № 5. — С. 66–70.
18. Могилевский М.А., Мынкин И.О. О теоретической прочности кристалла в условиях ударно-волнового нагружения // Физика горения и взрыва. — 1988. — № 6. — С. 106–111.